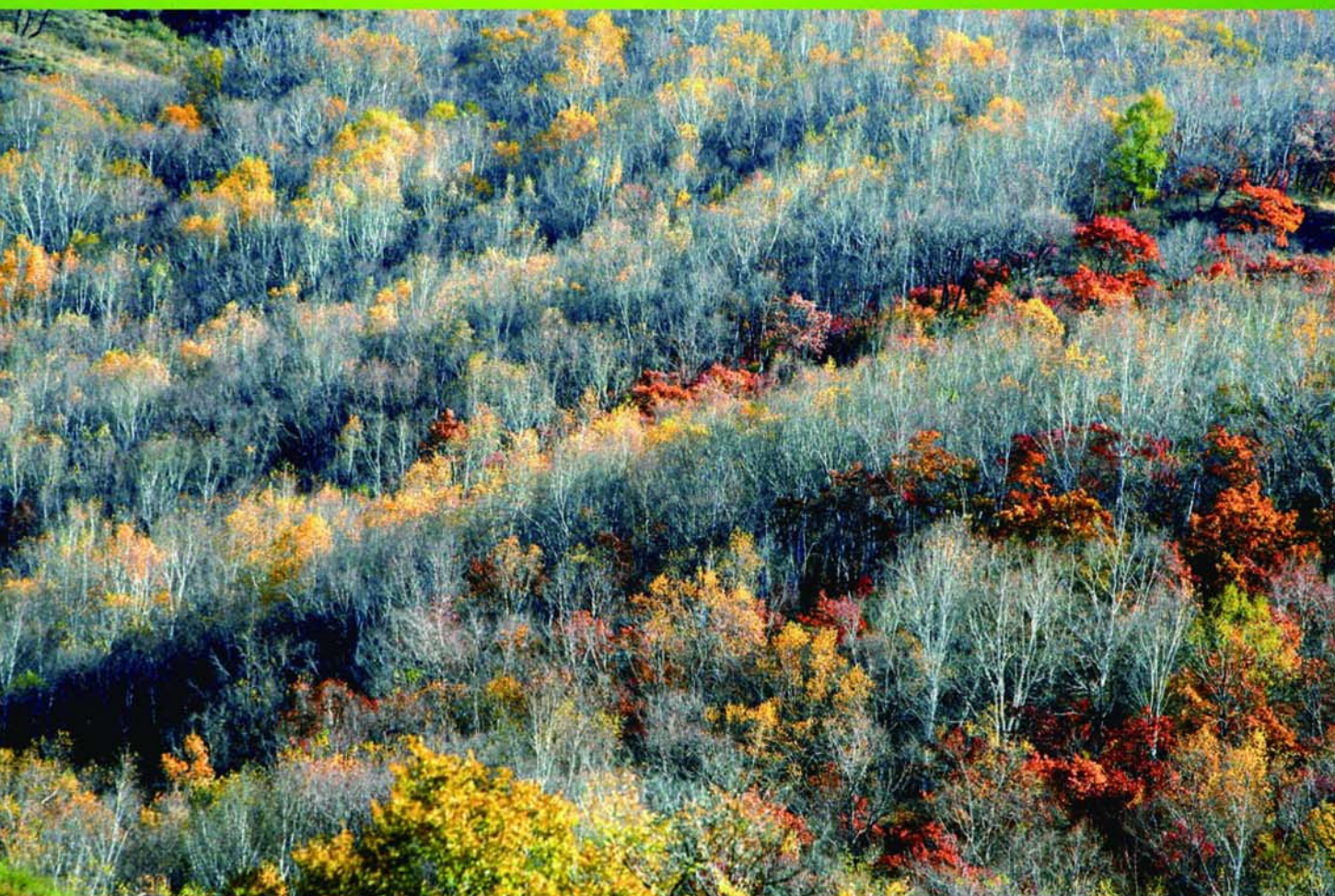


ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

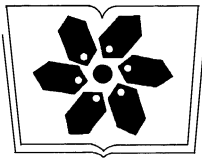
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第16期 Vol.31 No.16 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 16 期

2011 年 8 月 (半月刊)

目次

人工和天然湿地芦苇根际土壤细菌群落结构多样性的比较·····	汪仲琼,王为东,祝贵兵,等 (4489)
不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及其模拟·····	郎莹,张光灿,张征坤,等 (4499)
不同颜色遮阳网遮光对丘陵茶园夏秋茶和春茶产量及主要生化成分的影响·····	秦志敏,付晓青,肖润林,等 (4509)
镉胁迫对烟草叶激素水平、光合特性、荧光特性的影响·····	吴坤,吴中红,邵付菊,等 (4517)
条浒苔和缘管浒苔对镉胁迫的生理响应比较·····	蒋和平,郑青松,朱明,等 (4525)
盐胁迫对拟南芥和盐芥莲座叶芥子油苷含量的影响·····	庞秋颖,陈思学,于涛,等 (4534)
长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响·····	高菊生,曹卫东,李冬初,等 (4542)
基于水量平衡下灌区农田系统中氮素迁移及平衡的分析·····	杜军,杨培岭,李云开,等 (4549)
苏北海滨湿地互花米草种子特征及实生苗生长·····	徐伟伟,王国祥,刘金娥,等 (4560)
基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区秭归县非点源污染输出评价·····	田耀武,黄志霖,肖文发 (4568)
镉污染对不同生境拟水狼蛛氧化酶和金属硫蛋白应激的影响·····	张征田,庞振凌,夏敏,等 (4579)
印度洋南赤道流区水体叶绿素 a 的分布及粒级结构·····	周亚东,王春生,王小谷,等 (4586)
长江口滩涂围垦后水鸟群落结构的变化——以南汇东滩为例·····	张斌,袁晓,裴恩乐,等 (4599)
应用鱼类完整性指数 (FAII) 评价长江口沿岸碎波带健康状况·····	毛成贵,钟俊生,蒋日进,等 (4609)
基于渔业调查的南极半岛北部水域南极磷虾种群年龄结构分析·····	朱国平,吴强,冯春雷,等 (4620)
水稻模型 ORYZA2000 在湖南双季稻区的验证与适应性评价·····	莫志鸿,冯利平,邹海平,等 (4628)
旱地农田不同耕作系统的能量/碳平衡·····	王小彬,王燕,代快,等 (4638)
宁夏黄灌区稻田冬春休闲期硝态氮淋失量·····	王永生,杨世琦 (4653)
太湖沉积物有机碳与氮的来源·····	倪兆奎,李跃进,王圣瑞,等 (4661)
日偏食对乌鲁木齐空气可培养细菌群落的影响·····	马晶,孙建,张涛,等 (4671)
灰飞虱与褐飞虱种内和种间密度效应比较·····	吕进,曹婷婷,王丽萍,等 (4680)
圈养马来熊行为节律和时间分配的季节变化·····	兰存子,刘振生,王爱善,等 (4689)
塔里木荒漠河岸林干扰状况与林隙特征·····	韩路,王海珍,陈加利,等 (4699)
珍稀植物伯乐树一年生更新幼苗的死亡原因和保育策略·····	乔琦,秦新生,邢福武,等 (4709)
垃圾堆肥复合菌剂对干旱胁迫下草坪植物生理生态特性的影响·····	多立安,王晶晶,赵树兰 (4717)
CLM3.0-DGVM 中植物叶面积指数与气候因子的时空关系·····	邵璞,曾晓东 (4725)
基于生态效率的辽宁省循环经济分析·····	韩瑞玲,佟连军,宋亚楠 (4732)
专论与综述	
土壤食物网中的真菌/细菌比率及测定方法·····	曹志平,李德鹏,韩雪梅 (4741)
生态社区评价指标体系研究进展·····	周传斌,戴欣,王如松,等 (4749)
问题讨论	
不同胁迫条件下化感与非化感水稻 PAL 多基因家族的差异表达·····	方长甸,王清水,余彦,等 (4760)
研究简报	
钦州湾大型底栖动物生态学研究·····	王迪,陈丕茂,马媛 (4768)
人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征·····	董凯凯,王惠,杨丽原,等 (4778)
基于地统计学丰林自然保护区森林生物量估测及空间格局分析·····	刘晓梅,布仁仓,邓华卫,等 (4783)
晋西黄土区辽东栎、山杨树干液流比较研究·····	隋旭红,张建军,文万荣 (4791)
小兴安岭典型苔草和灌木沼泽 N ₂ O 排放及影响因子·····	石兰英,牟长城,田新民,等 (4799)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-08	



封面图说:在长白山麓低海拔地区的晚秋季节,成片的白桦林用无数根白色的树干、树枝烘托着林冠上跳动的金黄色叶片,共生的柞木树冠用更浓重的颜色显示了它的存在,整个山梁层林尽染,秋意浓浓。

彩图提供:陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

蒋和平, 郑青松, 朱明, 刘兆普, 姚瑶, 刘国红. 条浒苔和缘管浒苔对镉胁迫的生理响应比较. 生态学报, 2011, 31(16): 4525-4533.

Jiang H P, Zheng Q S, Zhu M, Liu Z P, Yao Y, Liu G H. Comparative physiological responses of cadmium stress on *Enteromorpha clathrata* and *Enteromorpha linza*. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(16): 4525-4533.

条浒苔和缘管浒苔对镉胁迫的生理响应比较

蒋和平¹, 郑青松^{1,2}, 朱 明^{1,3}, 刘兆普^{1,*}, 姚 瑶¹, 刘国红¹

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院 江苏省海洋生物学重点实验室, 南京 210095;

2. 浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室, 温州 325005; 3. 淮海工学院海洋学院, 连云港 222005)

摘要:为探讨大型海藻对重金属胁迫的生理响应及耐受机制,以条浒苔(*Enteromorpha clathrata*)和缘管浒苔(*Enteromorpha linza*)为试验材料,研究了不同浓度的镉(Cd^{2+})处理 7 d 对浒苔的生长、叶绿素(Chl)和类胡萝卜素(Car)含量、叶绿素荧光参数、可溶性糖(SS)和可溶性蛋白(SP)含量的影响。结果表明:随着 Cd^{2+} 浓度的增加,条浒苔和缘管浒苔鲜重(FW)和相对生长速率(RGR)与对照相比显著下降,且条浒苔的 FW 和 RGR 降低幅度均大于缘管浒苔的。镉胁迫下,Chl 和 Car 含量、Chl a/Chl b、PS II 最大光能转化效率(F_v/F_m)、PS II 实际光能转化效率(Yield)、最大相对电子传递速率($\text{rETR}_{\max}$,即 P_m)和光能利用效率(α)、SP 含量随着 Cd^{2+} 浓度的升高均出现下降趋势,除了 Chl 外,条浒苔的其它指标的降幅要大于缘管浒苔。随着镉胁迫强度的增加,浒苔 SS 含量呈现逐渐上升。相关分析显示,生长指标除了与 Chl/Car 无明显的相关性,与 SS 含量呈显著负相关外,与 Chl、Car、Chla/Chlb、 F_v/F_m 、Yield、 $\text{rETR}_{\max}$ 、 α 和 SP 均呈极显著正相关($P < 0.01$)。上述表明,条浒苔和缘管浒苔对 Cd^{2+} 胁迫均较敏感,而维持较高的 Car 含量、Chla/Chlb、 F_v/F_m 、Yield、 $\text{rETR}_{\max}$ 、 α 、SS 含量、SP 含量是缘管浒苔对镉耐性高于条浒苔的重要原因。而叶绿素含量、类胡萝卜素含量、叶绿素 a/叶绿素 b、 F_v/F_m 、Yield、 $\text{rETR}_{\max}$ 、 α 、可溶性蛋白和可溶性糖含量等均可以作为浒苔耐镉性的评价指标。

关键词:条浒苔;缘管浒苔;镉胁迫;生长;叶绿素荧光参数;评价指标

Comparative physiological responses of cadmium stress on *Enteromorpha clathrata* and *Enteromorpha linza*

JIANG Heping¹, ZHENG Qingsong^{1,2}, ZHU Ming^{1,3}, LIU Zhaopu^{1,*}, YAO Yao¹, LIU Guohong¹

1 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Marine Biology, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2 Zhejiang Key Laboratory of Exploitation and Preservation of Coastal Bio-resource, Wenzhou 325005, China

3 College of Oceanography, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China

Abstract: Cadmium pollution is one of the most extensive and harmful environmental problems all over the world. In recent years, with the continuous economic development, pollution by cadmium and other heavy metals in the coastal water body is becoming more serious. To investigate macroalgae physiological response to heavy metals and its resistant mechanisms, experiments were carried out to study the effects of different cadmium levels on growth, Chlorophyll (Chl) and Carotenoid (Car) contents, Chlorophyll fluorescence parameters, soluble sugar (SS) and soluble protein (SP) contents in *Enteromorpha clathrata* and *Enteromorpha linza*. The results were obtained as follows. (1) Growth of two *Enteromorpha* was sensitive to cadmium stress. With the increase of Cd^{2+} concentrations, the fresh weight (FW) and relative growth rate (RGR) of *E. clathrata* and *E. linza* were both decreased significantly. However, inhibition of FW and RGR in *E. clathrata*

基金项目:国家支撑项目(2008BAD95B05);浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室开放课题(2010F30003);江苏省海洋生物学重点实验室开放课题(JSMK2008-002);江苏省海洋资源开发研究院科技开发基金项目(JSIMR09B10)

收稿日期:2010-08-18; 修订日期:2011-04-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sea@njau.edu.cn

was more serious than that in *E. linza*. (2) Chl and Car contents of *E. clathrata* and *E. linza* were decreased significantly upon treatment with 20 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} ; When Cd^{2+} concentrations increased gradually, Chl and Car contents of two *Enteromorpha* were decreased more significantly, however, Car contents in *E. clathrata* decreased more significantly than those in *E. linza* under all Cd^{2+} treatments. Chlorophyll a/Chlorophyll b (Chla/Chlb) of *E. clathrata* and *E. linza* decreased gradually as Cd^{2+} concentration increased. However, the former (ie. *E. clathrata*) decreased more significantly than the latter. Chlorophyll/Carotenoid of *E. clathrata* was increased gradually as Cd^{2+} concentration increased; it reached the highest value when treated with Cd^{2+} at 60 $\mu\text{mol/L}$, and it started to decrease gradually when Cd^{2+} concentration increased further more; while Chlorophyll/Carotenoid of *E. linza* showed no significant change with all treatments of Cd^{2+} . (3) With the increase of Cd^{2+} concentrations, the maximal photochemical efficiency of PS II (F_v/F_m), the actual photochemical efficiency of PS II in the light (Yield), the maximal relative electron transport rate (rETR_{max} , Pm) and light use efficiency (α) of both *Enteromorpha* varieties were decreased significantly. The Pm decrease was much more than the decrease of F_v/F_m , Yield or α in both *Enteromorpha*. All chlorophyll fluorescence parameters of *E. clathrata* were decreased more than those of *E. linza*. (4) Compared with control, the soluble sugar (SS) contents decreased significantly in both *Enteromorpha* under 20 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} stress. When Cd^{2+} concentrations were increased, the SS contents of both *Enteromorpha* were increased too, but the SP contents showed a significant decline. The SS contents of *E. linza* were higher than those of *E. clathrata*, but the SP contents of *E. linza* decreased less obviously than those of *E. clathrata*. (5) The results also showed no significant correlation between growth indices and Chl/Car, significant and highly significant negative correlation between growth indices and SS content, highly significant positive correlations between growth indices and Chl content, Car content, Chla/Chlb ratio, F_v/F_m , Yield, rETR_{max} , α and SP content. The above results leads us to a conclusion that *E. clathrata* and *E. linza* were both sensitive to Cd^{2+} . However, Growth inhibition of *E. clathrata* was more than that of *E. linza* by Cd^{2+} stress. Better adaptation of *E. linza* to Cd^{2+} was mainly achieved by its higher Car contents, Chla/Chlb, F_v/F_m , Yield, rETR_{max} , α , SS contents and SP contents upon exposure to Cd^{2+} stress. Chl content, Car content, Chla/Chlb ratio, F_v/F_m , Yield, rETR_{max} , α , SP and SS content can regard as value indexes of cadmium tolerance of *Enteromorpha*.

Key Words: *Enteromorpha clathrata*; *Enteromorpha linza*; cadmium stress; growth; chlorophyll fluorescence parameters; evaluation index

镉污染是当今世界影响范围最广泛、危害最大的环境问题之一^[1]。近年来,随着我国沿海经济建设的不断发展,近海水域重金属污染愈加严重^[2-3]。镉毒性强,潜在活性大,易在食物链中流动和富集,是 IA 级致癌物^[1,4]。镉在水体中主要以离子形式存在, Cd^{2+} 是一种亲氧性和亲疏性的元素,能够形成各种形式的有机物,从而严重影响水生生态系统^[2,5]。大型海藻是海洋中的初级生产者,它在保持海洋生态系统的稳定中起着重要的作用。而且因为它能对海洋环境变化做出反应,也能积累许多重金属等污染物,大型海藻往往因此被作为有用的生物指示物^[6,7]。

条浒苔(*Enteromorpha clathrata*)和缘管浒苔(*Enteromorpha linza*)属石莼科(Ulvaceae)浒苔属,是我国海洋野生植物中极为丰富的大型经济绿藻类,均属于广温、广盐、耐干露性强的海藻,环境适应性强^[8-9]。目前,国内外有关浒苔属的研究多限于盐度、营养盐、温度、光照、pH 值等因子对浒苔生长、代谢、孢子释放的影响^[10-12],也有对浒苔属生活史、营养成分、多糖等方面^[13-17]的研究。而在浒苔属对镉、铜等重金属的耐受能力、镉等重金属对浒苔的毒性效应等方面研究很少^[18-20],其中关于条浒苔、缘管浒苔重金属胁迫方面的研究少之又少,或者说仅仅是刚刚起步,这方面的研究文献或报告非常缺乏。尤其是有关不同品种浒苔对镉等重金属胁迫的生物学比较等研究尚未见文献报告。因此本试验通过不同水平 Cd^{2+} 处理对条浒苔和缘管浒苔鲜重、相对生长速率、叶绿素荧光特性、可溶性糖、可溶性蛋白等影响,阐明不同浒苔品种对 Cd^{2+} 胁迫的生理响

应机制,旨在为今后挑选大型海藻对重金属污染的海洋环境进行修复,改善近海海域养殖区的环境以及大型海藻的开发利用提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料培养与处理

试验材料条浒苔(*Enteromorpha clathrata*)和缘管浒苔(*Enteromorpha linza*)均采自江苏连云港连岛海域。将采回的条浒苔和缘管浒苔用人工海水清洗干净,去除杂藻,选取生长良好的藻体放入含已灭菌的加入 VSE 培养液的人工海水(33.33‰)培养液的三角瓶(200 mL 培养液)暂养 5 d,以适应实验室的生长环境。然后称取 0.5 g 长势相同的藻体(称量时用滤纸吸干藻体表面的水分)转入含 0、20、40、60、80、100 $\mu\text{mol/L}$ $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 的人工海水(33.33‰)培养液处理。整个培养和处理过程均在 GXZ 型智能型光照培养箱中进行,每隔 1 d 更换 1 次处理液,温度(20 ± 1) $^{\circ}\text{C}$,光照度 4500—6000 lx,光:暗周期为 12h:12h,pH 值为 8.0。每个处理设置 3 个重复,7 d 后取样测定。

1.2 试验方法

1.2.1 鲜重和相对生长速率的测定

取出各处理的藻体,用滤纸吸干藻体表面的水分,称得鲜重。按下列公式计算得相对生长速率(Relative growth rate, RGR)^[21]。

$$RGR(\%/d) = [\ln(M_t/M_0)/t] \times 100\%$$

式中, M_0 为藻体初始鲜重, M_t 为 t 天后的藻体鲜重。

1.2.2 叶绿素和类胡萝卜素含量的测定

参照李合生等^[22]方法。称取藻体 0.1 g(鲜重 FM),将藻体剪碎,用 10 mL 95% 乙醇提取,4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中黑暗保存,24 h 后用紫外可见分光光度计在 665、649、470 nm 测定提取液的吸光值。通过计算得叶绿素 a(Chla)、叶绿素 b(Chlb)、叶绿素(Chl)、类胡萝卜素(Car)含量。

1.2.3 叶绿素荧光特性的测定

采用德国 Walz 公司生产的浮游植物荧光仪(phyto-PAM)进行叶绿素荧光各项参数的测定。测定前,将不同 Cd^{2+} 浓度处理下的两种浒苔样品进行暗适应 15 min,然后用 phyto-PAM 测定 F_v/F_m 、 $\Phi\text{PS II}$ (Yield)、 $r\text{ETR}_{\text{max}}$ 、 α 等参数。

1.2.4 可溶性糖(SS)和可溶性蛋白(SP)含量的测定

均参考文献^[22]。SS 含量采用蒽酮比色法测定,SP 含量采用考马斯亮蓝 G250 法测定。

1.3 数据处理

利用 Microsoft Excel 软件、SPSS13.0 软件进行试验数据的统计和相关性分析,采用 Duncan 检验进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同水平 Cd^{2+} 胁迫对条浒苔和缘管浒苔生长的影响

20 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 处理下,条浒苔和缘管浒苔鲜重、相对生长速率(RGR)均显著下降,随着 Cd^{2+} 浓度的增加,两浒苔的鲜重和 RGR 下降愈显著。20、40、60、80、100 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 胁迫下,条浒苔鲜重依次下降 13%、22%、27%、31%、41%,而缘管浒苔鲜重依次下降 11%、16%、20%、25%、27%;结果表明,相比缘管浒苔,条浒苔生长对 Cd^{2+} 更敏感,图 1 的结果也验证了这一点, Cd^{2+} 胁迫下,条浒苔的 RGR 要明显低于缘管浒苔,100 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 胁迫下,缘管浒苔 RGR 为 -3.6%/d,而条浒苔 RGR 低至 -7.6%/d(图 1)。

2.2 不同水平 Cd^{2+} 胁迫对条浒苔和缘管浒苔叶绿素(Chl)含量、类胡萝卜素(Car)含量、叶绿素 a/叶绿素 b 比值(Chla/Chlb)和叶绿素/类胡萝卜素比值(Chl/Car)的影响

20 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 处理下,两浒苔的 Chl 和 Car 含量均显著下降;当 Cd^{2+} 浓度逐渐增加时,两浒苔 Chl 和 Car 含量下降愈显著(图 2)。发现,60、80 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 处理下不同品种 Chl 含量下降幅度差异不明显,条浒苔 Chl

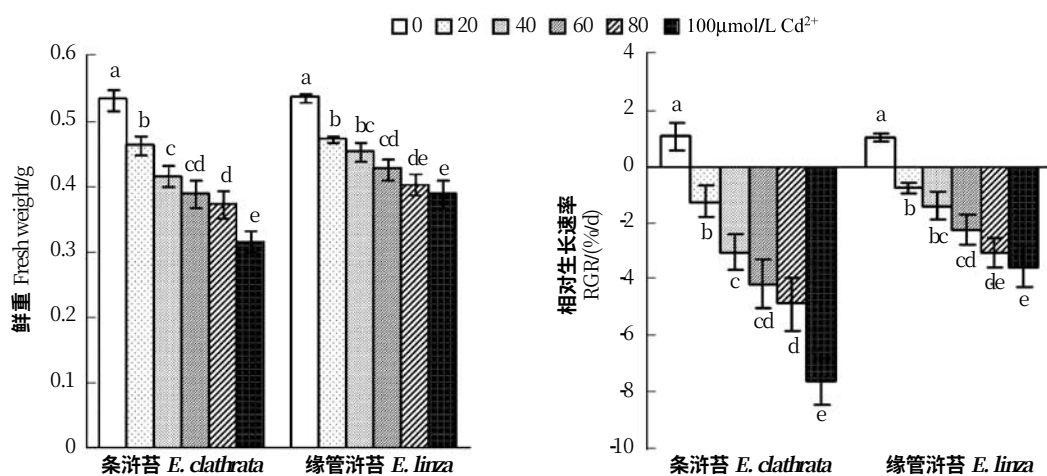


图1 不同 Cd²⁺ 浓度胁迫对条浒苔和缘管浒苔鲜重和相对生长速率的影响

Fig. 1 Effects of different Cd²⁺ concentrations on fresh weight and relative growth rate in *E. clathrata* and *E. linza*

同一簇中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 字母相同为差异不显著

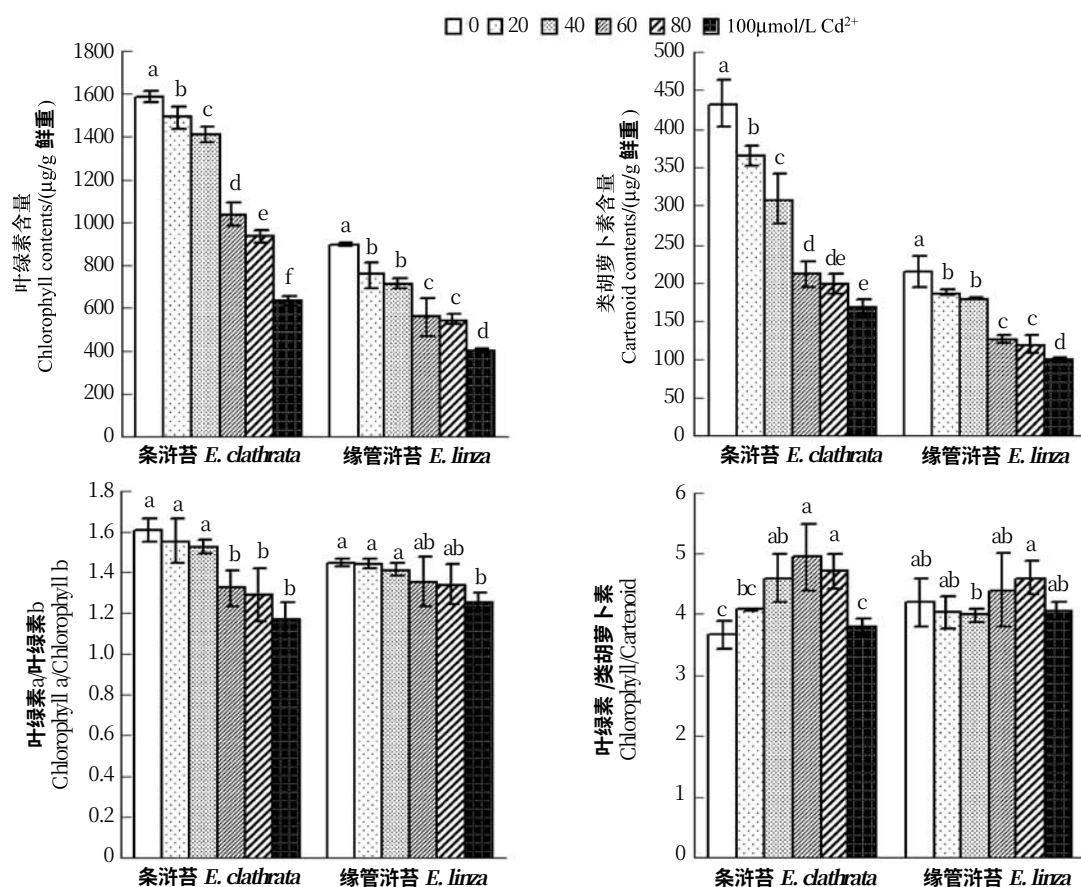


图2 不同 Cd²⁺ 浓度胁迫对条浒苔和缘管浒苔叶绿素、类胡萝卜素、叶绿素 a/叶绿素 b 和叶绿素/类胡萝卜素含量的影响

Fig. 2 Effects of different Cd²⁺ concentrations on Chlorophyll, Carotenoid, Chlorophyll a/Chlorophyll b and Chlorophyll/Carotenoid contents in *E. clathrata* and *E. linza*

含量依次下降 34% 和 41%, 而缘管浒苔 Chl 含量依次下降 37% 和 39%; 100 μmol/L Cd²⁺ 处理下, 条浒苔 Chl 含量下降高达 61%, 而缘管浒苔 Chl 含量下降 53% (图 2)。20、40、60、80、100 μmol/L Cd²⁺ 胁迫下, 条浒苔的

Car 含量依次下降 16%、29%、51%、51%、61%,而缘管浒苔的 Car 含量依次下降 13%、16%、41%、44%、55%,即镉胁迫下,条浒苔的 Car 含量降低较缘管浒苔更为明显(图 2)。

与各自的对照相比,随着 Cd^{2+} 浓度的增加,条浒苔和缘管浒苔的 Chla/Chlb 比值逐渐下降,当 Cd^{2+} 浓度为 60 $\mu\text{mol/L}$ 时,条浒苔 Chla/Chlb 的下降达到显著水平,而缘管浒苔的 Chla/Chlb 的下降一直到 Cd^{2+} 100 $\mu\text{mol/L}$ 时,才达显著水平。100 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 处理下,条浒苔和缘管浒苔 Chla/Chlb 分别下降 27% 和 13%。随着镉胁迫浓度的增加,条浒苔 Chl/Car 逐渐显著上升,在 Cd^{2+} 60 $\mu\text{mol/L}$ 时,达到最高值,镉浓度进一步上升,条浒苔 Chl/Car 逐渐降低;而镉胁迫下,缘管浒苔始终变化不显著(图 2)。

2.3 不同水平 Cd^{2+} 胁迫对条浒苔和缘管浒苔叶绿素荧光参数的影响

由图 3 可知,条浒苔和缘管浒苔 PS II 最大光能转化效率(F_v/F_m)、PS II 实际光能转化效率(Yield)、最大相对电子传递速率($rETR_{\max}$ 即 P_m)和光能利用效率(α)随着 Cd^{2+} 浓度的增加,均呈现逐渐显著下降趋势。20、40、60、80、100 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 胁迫下,条浒苔的 F_v/F_m 值依次下降 16%、18%、21%、24% 和 27%,缘管浒苔的 F_v/F_m 值依次下降 3%、7%、10%、13% 和 19%;条浒苔 Yield 依次下降 20%、40%、54%、66% 和 70%,缘管浒苔 Yield 则依次下降 3%、5%、16%、23% 和 32%;条浒苔 $rETR_{\max}$ 依次下降 53%、79%、86%、87% 和 89%,缘管浒苔 $rETR_{\max}$ 依次下降 30%、46%、55%、67% 和 77%;条浒苔 α 依次下降 12%、18%、23%、26% 和 32%,缘管浒苔 α 则依次下降 6%、8%、11%、17% 和 25%。结果表明,浒苔 P_m 对镉胁迫最敏感,镉胁迫下 P_m 的下降幅度远大于 F_v/F_m 、Yield 和 α ;条浒苔的所有叶绿素荧光参数的降幅要显著高于缘管浒苔的。

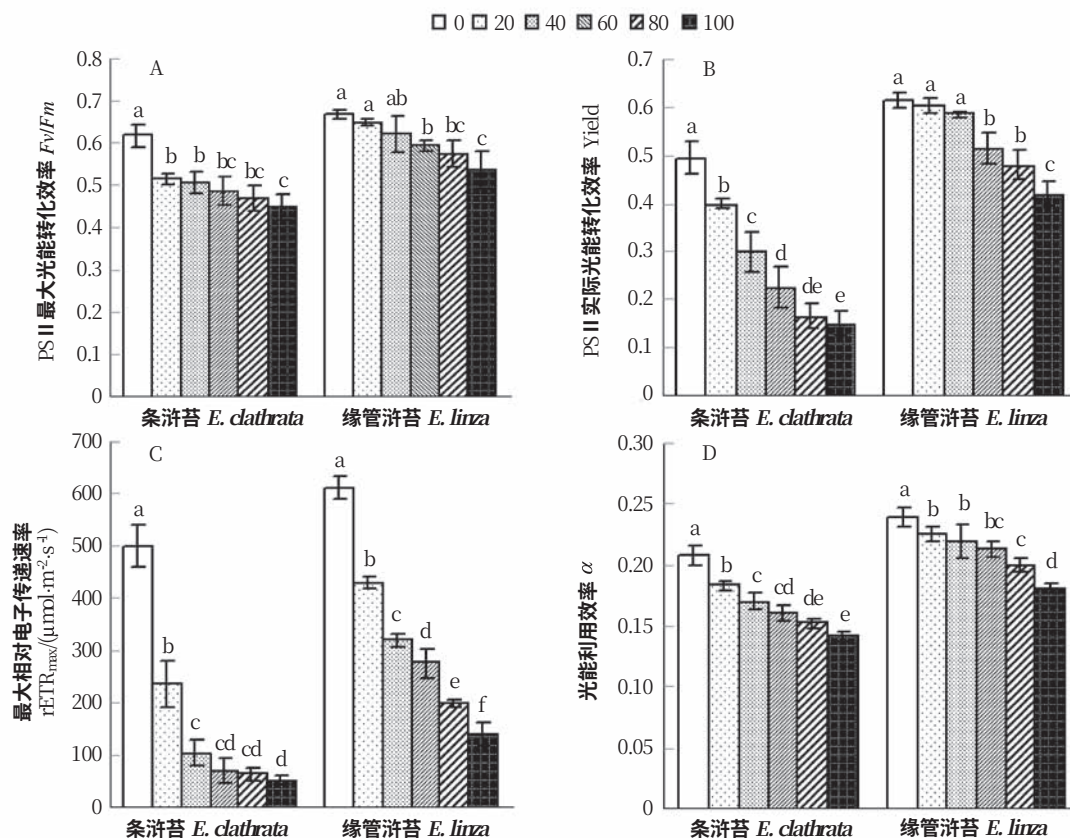


图 3 不同 Cd^{2+} 浓度胁迫对条浒苔和缘管浒苔 PS II 最大光能转化效率(F_v/F_m)、PS II 实际光能转化效率(Yield)、最大相对电子传递速率($rETR_{\max}$ 即 P_m)和光能利用效率(α)的影响

Fig. 3 Effects of different Cd^{2+} concentrations on F_v/F_m , Yield, $rETR_{\max}$, α in *E. clathrata* and *E. linza*

2.4 不同水平 Cd^{2+} 胁迫对两种浒苔可溶性糖(SS)和可溶性蛋白(SP)含量的影响

20 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 处理下,条浒苔和缘管浒苔的可溶性糖(SS)均显著降低,随着 Cd^{2+} 浓度的增加,两浒苔的

SS 含量呈上升趋势,当 Cd^{2+} 浓度达到 $80\text{ }\mu\text{mol/L}$ 时,两浒苔 SS 含量显著高于对照,均增加 38%,当 Cd^{2+} 浓度达到 $100\text{ }\mu\text{mol/L}$ 时,两浒苔 SS 含量显著高于对照,分别增加 60% 和 61%。 $20\text{ }\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 处理下,条浒苔和缘管浒苔的 SP 含量下降均不显著, $40\text{ }\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 处理下,条浒苔 SP 显著降低, $60\text{ }\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 处理下,条浒苔和缘管浒苔的 SP 含量均显著降低,分别降低 34% 和 20%; 80 、 $100\text{ }\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 处理下,条浒苔和缘管浒苔的 SP 含量分别降低 43%、43% 和 23%、25%。这表明,随着镉胁迫的加重,缘管浒苔 SS 含量增加更为显著,而其 SP 降低不如条浒苔更明显。

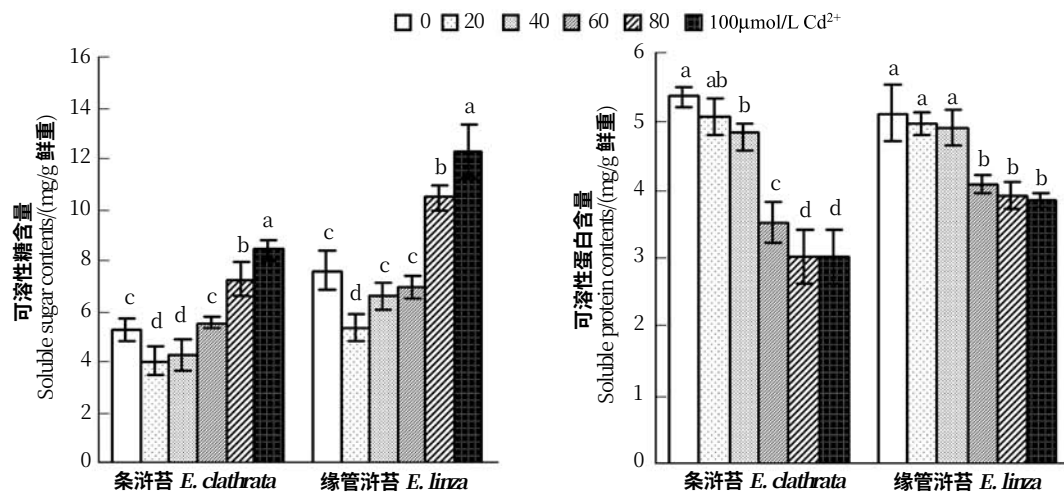


图 4 不同 Cd^{2+} 浓度胁迫对条浒苔和缘管浒苔可溶性糖 (SS) 和可溶性蛋白 (SP) 含量的影响

Fig. 4 Effects of different Cd^{2+} concentrations on soluble sugar (SS) and soluble protein (SP) content in *E. clathrata* and *E. linza*

2.5 Cd^{2+} 处理下浒苔生长指标与其它生理生化指标的相关性分析

由图 5 可知, Cd^{2+} 处理浓度与 Chl/Car 没有相关性,与 SS 呈极显著正相关 ($P < 0.01$) 外,与鲜重、RGR、 Chl 、 Car 、 Chla/Chlb 、 F_v/F_m 、Yield、 rETR_{max} 、 α 和 SP 均呈极显著负相关 ($P < 0.01$),其中 Cd^{2+} 浓度与鲜重、RGR 的相关系数分别低达 -0.910 和 -0.867 ,而除了鲜重与 SS 呈显著负相关 ($P < 0.05$),RGR 与 SS 呈极显著负相关 ($P < 0.01$) 外,鲜重、RGR 分别与 Chl 、 Car 、 Chla/Chlb 、 F_v/F_m 、Yield、 rETR_{max} 、 α 和 SP 均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

表 1 条浒苔和缘管浒苔各指标间的相关性分析

Table 1 Correlative coefficients between indexes of *E. clathrata* and *E. linza*

	$[\text{Cd}^{2+}]$	FW	RGR	Chl	Car	Chla/Chlb	Chl/Car	F_v/F_m	Yield	rETR_{max}	α	SS	SP
$[\text{Cd}^{2+}]$	1												
FW	-0.910^{**}	1											
RGR	-0.867^{**}	0.818^{**}	1										
Chl	-0.648^{**}	0.438^{**}	0.460^{**}	1									
Car	-0.684^{**}	0.516^{**}	0.543^{**}	0.964^{**}	1								
Chla/Chlb	-0.785^{**}	0.715^{**}	0.621^{**}	0.672^{**}	0.710^{**}	1							
Chl/Car	0.222	-0.272	-0.318	-0.027	-0.274	-0.286	1						
F_v/F_m	-0.630^{**}	0.775^{**}	0.647^{**}	-0.080	0.024	0.439^{**}	-0.291	1					
Yield	-0.593^{**}	0.760^{**}	0.578^{**}	-0.129	-0.021	0.416^{*}	-0.307	0.922^{**}	1				
rETR_{max}	-0.808^{**}	0.910^{**}	0.812^{**}	0.167	0.291	0.522^{**}	-0.392^{*}	0.878^{**}	0.837^{**}	1			
α	-0.652^{**}	0.791^{**}	0.642^{**}	-0.087	0.000	0.439^{**}	-0.233	0.935^{**}	0.951^{**}	0.882^{**}	1		
SS	0.656^{**}	-0.346^{*}	-0.524^{**}	-0.770^{**}	-0.706^{**}	-0.573^{**}	-0.048	-0.002	0.021	-0.163	-0.037	1	
SP	-0.863^{**}	0.855^{**}	0.713^{**}	0.491^{**}	0.550^{**}	0.810^{**}	-0.303	0.667^{**}	0.712^{**}	0.753^{**}	0.697^{**}	-0.464^{**}	1

$[\text{Cd}^{2+}]$ 为镉浓度,FW 为鲜重,RGR 为相对生长速率,Chl 为叶绿素含量,Car 为类胡萝卜素含量,Chla/Chlb 为叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值,Chl/Car 为叶绿素含量与类胡萝卜素含量的比值, F_v/F_m 为 PS II 最大光能转化效率,Yield 为 PS II 实际光能转化效率, rETR_{max} 为最大相对电子传递速率, α 光能利用效率,SS 为可溶性糖含量,SP 为可溶性蛋白含量;* 显著性水平 $P < 0.05$,** 显著性水平 $P < 0.01$ (双尾检验, $n = 18$)

3 讨论

本研究指出,镉胁迫明显降低浒苔的生物量,相对生长速率(*RGR*)显著下降。并研究了镉对两种浒苔色素、叶绿素荧光特性参数、可溶性蛋白和可溶性糖含量等的效应。各指标的相关性分析显示, Cd^{2+} 处理浓度与浒苔鲜重的极显著负相关性要大于其它指标,表明浒苔生长的抑制、生物量降低是镉胁迫下浒苔最敏感的生理响应。浒苔的生长指标(鲜重、相对生长速率)与叶绿素/类胡萝卜素比值没有相关性,而与叶绿素含量、类胡萝卜素含量、叶绿素 *a*/叶绿素 *b*、*Fv/Fm*、Yield、*rETR*_{max}、 α 、可溶性蛋白含量等有极显著的负相关,和可溶性糖含量均有显著或极显著的正相关性。因此可以推断,在进行浒苔耐镉能力评价时,除了叶绿素/类胡萝卜素比值这一指标外,其它测定指标均可作为评价指标。

迄今为止,人们对 Cd^{2+} 胁迫的作用模式还不太清楚,但是它对硫和氧有高亲和力,其组成物质能阻断生物体的基本功能^[5],结果就抑制了生物体对大量、微量营养元素的吸收和转运,从而导致生物体营养的匮乏,使其生长下降^[23]。郑霞等^[18]研究表明,5 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 处理 3 d,肠浒苔褪绿 20%,处理 5 d,褪绿 40%,100 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 处理肠浒苔 1 d,肠浒苔即褪绿 60%,处理 2 d,褪绿 80%。余江等^[24]报道,当 Cd^{2+} 浓度 < 3.0 mg/L (26.8 $\mu\text{mol/L}$) 时,龙须菜生长良好,当 Cd^{2+} 浓度 ≥ 3.0 mg/L 时,龙须菜的生长受到明显的抑制。而本研究中,首次就不同浒苔品种对镉胁迫的响应进行了比较研究。结果表明,20 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 处理下,条浒苔和缘管浒苔鲜重均显著降低,随着胁迫的加重,这一降低愈显著,但是缘管浒苔的鲜重降低幅度要明显低于条浒苔, Cd^{2+} 浓度从 20 增加到 100 $\mu\text{mol/L}$ 的过程中,条浒苔的 *RGR* 的下降速度几乎是缘管浒苔的 2 倍。这说明两种浒苔对 Cd^{2+} 的耐受性存在差异,即缘管浒苔的对镉的适应性大于条浒苔的。

重金属胁迫往往会导致藻类细胞光合色素含量下降,光合作用抑制,细胞畸变等^[25]。Stobart 等^[26]研究表明,叶绿素含量下降是因为叶绿素酯酶受到了重金属离子的抑制,同时影响了氨基酮戊酸的合成,而这两种物质分别是叶绿素合成所必须的酶和原料^[27]。本研究中,条浒苔和缘管浒苔的叶绿素(*Chl*)含量和叶绿素 *a*/叶绿素 *b* (*Chla/Chlb*) 比值在 Cd^{2+} 胁迫下均呈下降趋势,表明镉胁迫不仅影响 *Chl* 含量,还影响其构成,即其 *Chl a* 的合成对镉胁迫更敏感。*Chl* 含量的降低很可能是因为 Cd^{2+} 与 *Chl* 合成的几种酶(原叶绿素酯还原酶、氨基乙酰丙酸合成酶和胆色素原脱氨酶)的巯基($-\text{SH}$)结合,从而抑制了这些酶的活性、阻碍 *Chl* 的合成^[27]。结果还表明,不同镉浓度胁迫下,条浒苔类胡萝卜素(*Car*)含量的下降幅度均比缘管浒苔大,表明缘管浒苔在镉胁迫下,能维持相对较高的 *Car* 含量,而 *Car* 作为植物体内非酶促抗氧化系统,能够有效地清除活性氧,防止膜的过氧化,维持膜结构的稳定性,避免细胞伤害^[28]。

光合作用是植物体内极为重要的代谢过程,许多重金属胁迫主要是通过影响光能的捕获、细胞色素的合成、质体蓝素、质体醌、铁硫蛋白和 NADP^+ 等来降低藻类等植物光合作用^[25-26,29]。*PS II* 是光合作用的重要部位,也是重金属的主要抑制靶标,一些重金属如 Hg^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 能够取代 *PS II* 叶绿素分子中央的 Mg^{2+} ,这个过程损害了集光天线^[30]。在本试验中,20 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 处理下,条浒苔 *Fv/Fm* 和 Yield 即显著降低,说明 Cd^{2+} 对其 *PS II* 有明显的毒害作用,降低了 *PS II* 的原初光能捕获能力和电子传递能力^[31],而缘管浒苔 *Fv/Fm* 和 Yield 在 Cd^{2+} 浓度 ≥ 60 $\mu\text{mol/L}$ 时才显著下降,这可能与缘管浒苔 *PS II* 和细胞内的电化学平衡有关^[32]。*Fv/Fm* 值的下降代表植物受到胁迫^[31],条浒苔 *Fv/Fm* 的下降速度比缘管浒苔的快,说明条浒苔在不同浓度的 Cd^{2+} 处理中受到的胁迫比缘管浒苔大,这与本研究中浒苔的鲜重和 *RGR* 数据得出的结论相一致。而随着 Cd^{2+} 浓度的递增,两种浒苔的 *rETR*_{max} 也显著下降,在叶绿素荧光各参数里,*rETR*_{max} 表现为与 Cd^{2+} 处理浓度最大的负相关性,在所有的生理生化指标中,*rETR*_{max} 和生长指标(鲜重和 *RGR*)有最大的正相关性,这说明电子传递受到了明显的阻碍,进而影响 *PS II* 反应中心无法接受光子,光子累积到一定程度产生光抑制,使藻的细胞同化力(NADPH 和 ATP)无法正常形成,这就影响了对碳的固定和同化,光合利用效率和转化效率也就明显下降^[27,29,31]。

可溶性糖(*SS*)和可溶性蛋白(*SP*)为细胞两种重要的细胞渗透调节物质,一些 *SS* 还是活性氧清除剂^[33],而大多数 *SP* 是功能蛋白和参与各种代谢的酶类,有研究报道,低浓度的 Cd^{2+} 能诱导可溶性蛋白质含量如镉

结合蛋白增加,而降低镉的毒性。这可能是植物抵抗 Cd 毒害的一种解毒机制;但高浓度镉对蛋白质的合成起破坏作用^[34]。测植物的 SS 和 SP 含量是了解植物体总代谢的一个重要指标^[33,35-36]。当植物受到胁迫时,可以通过提高或者维持它们的含量来保护细胞免受伤害,维持正常的生理代谢^[35]。本试验中,低 Cd²⁺ 处理下,两浒苔 SS 含量均显著下降,这可能是碳代谢朝着更有利于渗透调节的有机物生成方向转移,如蛋白质、甜菜碱等^[36]。随 Cd²⁺ 处理强度的增加,条浒苔和缘管浒苔 SS 含量均逐渐显著升高。两种浒苔在 Cd²⁺ 胁迫逐渐加重,SP 含量均逐渐下降,从而表现出与 Cd²⁺ 浓度很强的负相关,与生长指标很强的正相关性,这很可能是由于浒苔对镉敏感,镉进入细胞后促进了蛋白水解酶的活性,加速了原有蛋白质分解,且镉对蛋白合成的众多酶系均有抑制作用,并且会使蛋白质合成的相关细胞器受到损伤,抑制了新蛋白的合成^[37]。条浒苔 SP 含量的下降比缘管浒苔快,表明缘管浒苔比条浒苔在 Cd²⁺ 胁迫下维持较高的代谢。

综上所述,在高浓度 Cd²⁺ 胁迫下,两种浒苔的生长、光合色素、叶绿素荧光参数,SS 和 SP 均发生了明显变化,这些变化使得两种浒苔对不同浓度的 Cd²⁺ 有不同的耐受能力,缘管浒苔耐镉性显著高于条浒苔。这主要表现在镉胁迫下缘管浒苔比条浒苔维持更高的生物量、相对生长速率、光合色素、叶绿素荧光参数、可溶性糖和可溶性蛋白含量。也表现为叶绿素含量、类胡萝卜素含量、叶绿素 a/叶绿素 b、Fv/Fm、Yield、rETR_{max}、α、可溶性蛋白和可溶性糖含量均可以作为浒苔耐镉性的评价指标。但是有关浒苔属对镉胁迫的适应机制仍有待深入探讨。

References:

- [1] Nordberg G F. Historical perspectives on cadmium toxicology. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2009, 238(3): 192-200.
- [2] Chen T R, Yu K F, Li S, Price G J, Shi Q, Wei G J. Heavy metal pollution recorded in *Porites* corals from Daya Bay, northern South China Sea. *Marine Environmental Research*, 2010, 70(3/4): 318-326.
- [3] Zheng G X, Song J M, Wei J F, Cheng L R, Yuan H M. Effects of heavy metal (copper, cadmium, zinc and lead) on marine inorganic carbon system in simulated experiments. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3009-3018.
- [4] Sokolova I M, Sokolov E P, Ponnappa K M. Cadmium exposure affects mitochondrial bioenergetics and gene expression of key mitochondrial proteins in eastern oyster *Crassostrea virginica* Gmelin (Bivalvia; Ostreidae). *Aquatic Toxicology*, 2005, 73(3): 242-255.
- [5] Webster E A, Murphy A J, Chudek J A, Gadd G M. Metabolism-independent binding of toxic metals by *Ulva lactuca*: cadmium binds to oxygen-containing groups, as determined by NMR. *Biometals*, 1997, 10(2): 105-117.
- [6] Masakorala K, Turner A, Brown M T. Influence of synthetic surfactants on the uptake of Pd, Cd and Pb by the marine macroalga, *Ulva lactuca*. *Environmental Pollution*, 2008, 156(3): 897-904.
- [7] Haritonidis S, Malea P. Bioaccumulation of metals by the green alga *Ulva rigida* from Thermaikos Gulf, Greece. *Environmental Pollution*, 1999, 104(3): 365-372.
- [8] Martins I, Marques J C. A model for the growth of opportunistic macroalgae (*Enteromorpha* sp.) in tidal estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 55(2): 247-257.
- [9] Zhang H Y, Wu W X, Song L Z, Peng X M, Wang L G, Xu S N, He P M. Trial and field cultivation of *Enteromorpha clathrata* and effects of ecological factors on its growth. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2006, 13(5): 781-786.
- [10] Wang J W, Yan B L, Ling A P, Hu J P, Shen S D. Ecological factor research on the growth and induction of spores release in *Enteromorpha prolifera* (Chlorophyta). *Marine Science Bulletin*, 2007, 26(2): 60-65.
- [11] Sousa A I, Martins I, Lillebø A I, Flindt M R, Pardal M A. Influence of salinity, nutrients and light on the germination and growth of *Enteromorpha* sp. spores. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, 341(1): 142-150.
- [12] Cohen R A, Fong P. Nitrogen uptake and assimilation in *Enteromorpha intestinalis* (L.) Link (Chlorophyta): using ¹⁵N to determine preference during simultaneous pulses of nitrate and ammonium. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2004, 309(1): 67-77.
- [13] Ganesan K, Kumar K S, Rao P V S. Comparative assessment of antioxidant activity in three edible species of green seaweed, *Enteromorpha* from Okha, Northwest coast of India. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2010, 12(1): 73-78.
- [14] Ling A P, Wang J W, Yan B L, Shen S D. The primary study of tissue culture of *Enteromorpha prolifera*. *Ecological Science*, 2006, 25(4): 320-324.
- [15] Wang X K, Ma J H, Ye D C, Chen X D. Preliminary study on the life history of *Enteromorpha prolifera*. *Marine Science Bulletin*, 2007, 26(5): 1212-1216.
- [16] Xu D L, Huang X C, Yang W G, Wu D, Cao W Q. Analysis of nutrition composition of *Enteromorpha prolifera*. *Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science*, 2003, 22(4): 318-320.
- [17] Zhou H P, Zhu H Y, Chen Q H. Isolation, purification and analysis of the polysaccharide of *Enteromorpha prolifera*. *Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 1995, 11(1): 91-94.
- [18] Zheng X, Shao S G, Yan B L. Effects of Cd²⁺ stress on alga *Enteromorpha intestinalis*. *Fisheries Science*, 2007, 26(7): 411-413.
- [19] Chen S H, Cui D L, Ma Y X, Mo W K. Effects of Cd²⁺ stress on some physiological characteristics of *Enteromorpha clathrata* (Roth) greville.

- Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science, 2010, 29(2): 179-182.
- [20] Andrade L R, Farina M, Filho G M A. Effects of copper on *Enteromorpha flexuosa* (Chlorophyta) in vitro. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, 58(1): 117-125.
- [21] Zhu X F, Zhou D H, Jian J B, Chen W Z, Liu H H, Du H. Physiological responses of *Gracilaria lemaneiformis* to copper stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(6): 1438-1444.
- [22] Li H S, Sun Q, Zhao S J, Zhang W H. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [23] Kumar M, Kumari P, Gupta V, Anisha P A, Reddy C R K, Jha B. Differential responses to cadmium induced oxidative stress in marine macroalgae *Ulva lactuca* (Ulvales, Chlorophyta). *Biometals*, 2010, 23(2): 315-325.
- [24] Yu J, Yang Y F, Nie X P. Response of seaweed *Gracilaria Lemaneiformis* to cadmium stress. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2007, 39(3): 83-90.
- [25] Kuang Q J, Xia Y C, Hui Y. Toxic effects of heavy metals on algae. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1996, 20(3): 277-283.
- [26] Stobart A K, Griffiths W T, Bukhari-Ameen B I, Sherwood R P. The effect of Cd^{2+} on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley. *Physiolgia Plantarum*, 1985, 63(33): 293-298.
- [27] Yuan M, Tie B Q, Tang M Z. Effects of Cd, Pb, Cu, Zn and As single pollution on chlorophyll content and antioxidant enzyme system of *Eulaliopsis binata*. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6): 929-932.
- [28] Niyogi K K. Photoprotection revised: genetic and molecular approaches. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1999, 50: 333-359.
- [29] Baumann H A, Morrison L, Stengel D B. Metal accumulation and toxicity measured by PAM-Chlorophyll fluorescence in seven species of marine macroalgae. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(4): 1063-1075.
- [30] Rodríguez M C, Barsanti L, Passarelli V, Evangelista V, Conforti V, Gualtieri P. Effects of chromium on photosynthetic and photoreceptive apparatus of the alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Environmental Research*, 2007, 105(2): 234-239.
- [31] Li L, Yuan L, Song L N, Gu Y J. Effects of cadmium stress on chlorophyll fluorescence parameters of *Lemna minor* L. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(5): 1062-1068.
- [32] Brzaz J E, Carballeira A. Chlorophyll fluorescence analysis and cadmiumcopper bioaccumulation in *Ulva rigida* (C. Agardh). *Boletín del Instituto Espanol de Oceanografia*, 1999, 15(14): 395-399.
- [33] Xu R Y, Niimi Y, Han D S. Changes in endogenous abscisic acid and soluble sugars levels during dormancy-release in bulbs of *Lilium rubellum*. *Scientia Horticulturae*, 2006, 111(1): 68-72.
- [34] Tudoreanu L, Phillips C J C. Modeling cadmium uptake and accumulation in plants. *Advances in Agronomy*, 2004, 84: 121-157.
- [35] Du X, Shen X H. Effects of cadmium stress on physiological and biochemical indices of *Viburnum odoratissimum* and *V. tinus* seedlings. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(5): 899-904.
- [36] Chen J M, Zheng Q S, Liu Z P, Liu L, Long X H. Response characteristics of physiology and ecology to salt stress in two varieties of *Jatropha curcas* L. Seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 933-940.
- [37] Xu A C, Chen Y T, Wang S F, Wu T L. Changes of physiological characteristic of five salix clones under cadmium stress. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 410-415.

参考文献:

- [3] 郑国侠, 宋金明, 魏俊峰, 陈丽荣, 袁华茂. 重金属(铜、镉、锌和铅)对海水无机碳体系影响的模拟研究. *生态学报*, 2009, 29(6): 3009-3018.
- [9] 张寒野, 吴望星, 宋丽珍, 彭小明, 王兰刚, 徐姗姗, 何培民. 条浒苔海区试栽培及外界因子对藻体生长的影响. *中国水产科学*, 2006, 13(5): 781-786.
- [10] 王建伟, 阎斌伦, 林阿朋, 胡静平, 沈颂东. 浒苔(*Enteromorpha prolifera*)生长及孢子释放的生态因子研究. *海洋通报*, 2007, 26(2): 60-65.
- [14] 林阿朋, 王建伟, 阎斌伦, 沈颂东. 浒苔 *Enteromorpha prolifera* 组织培养初步研究. *生态科学*, 2006, 25(4): 320-324.
- [15] 王晓坤, 马家海, 叶道才, 陈孝德. 浒苔(*Enteromorpha prolifera*)生活史的初步研究. *海洋通报*, 2007, 26(5): 1212-1216.
- [16] 徐大伦, 黄晓春, 杨文鸽, 吴丹, 曹卫庆. 浒苔营养成分分析. *浙江海洋学院学报: 自然科学版*, 2003, 22(4): 318-320.
- [17] 周慧萍, 朱海燕, 陈琼华. 浒苔多糖的分离、纯化和分析. *中国生物化学与分子生物学报*, 1995, 11(1): 91-94.
- [18] 郑霞, 邵世光, 阎斌伦. 镉污染对肠浒苔毒性作用研究. *水产科学*, 2007, 26(7): 411-413.
- [19] 陈士辉, 崔大练, 马玉心, 莫伟钊. Cd^{2+} 对条浒苔部分生理生化指标的影响. *浙江海洋学院学报: 自然科学版*, 2010, 29(2): 179-182.
- [21] 朱喜峰, 戴定辉, 简建波, 陈伟洲, 刘慧慧, 杜虹. 龙须菜对重金属铜胁迫的生理响应. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1438-1444.
- [22] 李合生, 孙群, 赵世杰, 章文华. 植物生理生物实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [24] 余江, 杨宇峰, 聂湘平. 大型海藻龙须菜对重金属镉胁迫的响应. *四川大学学报: 工程科学版*, 2007, 39(3): 83-90.
- [25] 况琪军, 夏宜璋, 惠阳. 重金属对藻类的致毒效应. *水生生物学报*, 1996, 20(3): 277-283.
- [27] 袁敏, 铁柏清, 唐美珍. 重金属单一污染对龙须草叶绿素含量和抗氧化酶系统的影响. *土壤通报*, 2005, 36(6): 929-932.
- [31] 李伶, 袁琳, 宋丽娜, 顾泳洁. 镉对浮萍叶绿素荧光参数的影响. *环境科学学报*, 2010, 30(5): 1062-1068.
- [35] 杜晓, 申晓辉. 镉胁迫对珊瑚树和地中海莢蒾生理生化指标的影响. *生态学杂志*, 2010, 29(5): 899-904.
- [36] 陈健妙, 郑青松, 刘兆普, 刘联, 隆小华. 两种麻疯树苗对盐胁迫的生理生态响应. *生态学报*, 2010, 30(4): 933-940.
- [37] 徐爱春, 陈益泰, 王树凤, 吴天林. 镉胁迫下柳树5个无性系生理特性的变化. *生态环境*, 2007, 16(2): 410-415.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.31 ,No. 16 August ,2011 (Semimonthly)

CONTENTS

A comparative study on the diversity of rhizospheric bacteria community structure in constructed wetland and natural wetland with reed domination	WANG Zhongqiong, WANG Weidong, ZHU Guibing, et al (4489)
Light response of photosynthesis and its simulation in leaves of <i>Prunus sibirica</i> L. under different soil water conditions	LANG Ying, ZHANG Guangcan, ZHANG Zhengkun, et al (4499)
Effects of colour shading on the yield and main biochemical components of summer-autumn tea and spring tea in a hilly tea field	QIN Zhimin, FU Xiaoqing, XIAO Runlin, et al (4509)
Effects of cadmium on the contents of phytohormones, photosynthetic performance and fluorescent characteristics in tobacco leaves	WU Kun, WU Zhonghong, TAI Fujun, et al (4517)
Comparative physiological responses of cadmium stress on <i>Enteromorpha clathrata</i> and <i>Enteromorpha linza</i>	JIANG Heping, ZHENG Qingsong, ZHU Ming, et al (4525)
Effects of salt stress on glucosinolate contents in <i>Arabidopsis thaliana</i> and <i>Thellungiella halophila</i> rosette leaves	PANG Qiuying, CHEN Sixue, YU Tao, et al (4534)
Effects of long-term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field	GAO Jusheng, CAO Weidong, LI Dongchu, et al (4542)
Nitrogen balance in the farmland system based on water balance in Hetao irrigation district, Inner Mongolia	DU Jun, YANG Peiling, LI Yunkai, et al (4549)
Seed characteristics and seedling growth of <i>Spartina alterniflora</i> on coastal wetland of North Jiangsu	XU Weiwei, WANG Guoxiang, LIU Jin'e, et al (4560)
Assessment of non-point source pollution export from Zigui county in the Three Gorges Reservoir area using the AnnAGNPS model	TIAN Yaowu, HUANG Zhilin, XIAO Wenfa (4568)
Effects of Cadmium pollution on oxidative stress and metallothionein content in <i>Pirata subpiraticus</i> (Araneae: Lycosidae) in different habitats	ZHANG Zhengtian, PANG Zhenling, XIA Min, et al (4579)
The distribution of size-fractionated chlorophyll a in the Indian Ocean South Equatorial Current	ZHOU Yadong, WANG Chunsheng, WANG Xiaogu, et al (4586)
Change of waterbird community structure after the intertidal mudflat reclamation in the Yangtze River Mouth: a case study of NanHui Dongtan area	ZHANG Bin, YUAN Xiao, PEI Enle, et al (4599)
Application of fish assemblage integrity index (FAII) in the environment quality assessment of surf zone of Yangtze River estuary	MAO Chengze, ZHONG Junsheng, JIANG Rijin, et al (4609)
Population age structure of Antarctic krill <i>Euphausia superba</i> off the northern Antarctic Peninsula based on fishery survey	ZHU Guoping, WU Qiang, FENG Chunlei, et al (4620)
Validation and adaptability evaluation of rice growth model ORYZA2000 in double cropping rice area of Hunan Province	MO Zhihong, FENG Liping, ZOU Haiping, et al (4628)
Coupled energy and carbon balance analysis under dryland tillage systems	WANG Xiaobin, WANG Yan, DAI Kuai, et al (4638)
The nitrate-nitrogen leaching amount in paddy winter-spring fallow period	WANG Yongsheng, YANG Shiqi (4653)
The sources of organic carbon and nitrogen in sediment of Taihu Lake	NI Zhaoxui, LI Yuejin, WANG Shengrui, et al (4661)
Effect of partial solar eclipse on airborne culturable bacterial community in Urumqi	MA Jing, SUN Jian, ZHANG Tao, et al (4671)
Comparative study on density related intra- and inter-specific effects in <i>Laodelphax striatellus</i> (Fallen) and <i>Nilaparvata lugens</i> (Stål)	LÜ Jin, CAO Tingting, WANG Liping, et al (4680)
Behavior rhythm and seasonal variation of time budget of sun bear (<i>Helarctos malayanus</i>) in captivity	LAN Cunzi, LIU Zhensheng, WANG Aishan, et al (4689)
Disturbance regimes and gaps characteristics of the desert riparian forest at the middle reaches of Tarim River	HAN Lu, WANG Haizhen, CHEN Jiali, et al (4699)
Death causes and conservation strategies of the annual regenerated seedlings of rare plant, <i>Bretschneidera sinensis</i>	QIAO Qi, QIN Xinsong, XING Fuwu, et al (4709)
Effects of municipal compost extracted complex microbial communities on physio-ecological characteristics of turfgrass under drought stress	DUO Lian, WANG Jingjing, ZHAO Shulan (4717)
Spatiotemporal relationship of leaf area index simulated by CLM3.0-DGVM and climatic factors	SHAO Pu, ZENG Xiaodong (4725)
Analysis of circular economy of Liaoning Province based on eco-efficiency	HAN Ruiling, TONG Lianjun, SONG Yanan (4732)
Review and Monograph	
The fungal to bacterial ratio in soil food webs, and its measurement	CAO Zhiping, LI Depeng, HAN Xuemei (4741)
Indicators for evaluating sustainable communities: a review	ZHOU Chuanbin, DAI Xin, WANG Rusong, et al (4749)
Discussion	
Differential expression of <i>PAL</i> multigene family in allelopathic rice and its counterpart exposed to stressful conditions	FANG Changxun, WANG Qingshui, YU Yan, et al (4760)
Scientific Note	
Ecology study on the benthic animals of QinZhou Bay	WANG Di, CHEN Pimao, MA Yuan (4768)
Change characteristics of soil carbon and nitrogen contents in the Yellow River Delta soil after artificial restoration	DONG Kaikai, WANG Hui, YANG Liyuan, et al (4778)
Estimation and spatial pattern analysis of forest biomass in Fenglin Nature Reserve based on Geostatistics	LIU Xiaomei, BU Rencang, DENG Huawei, et al (4783)
Study on sap flow in forest of <i>Quercus liaotungensis</i> and <i>Populus davidiana</i> by using the TDP method	SUI Xuhong, ZHANG Jianjun, WEN Wanrong (4791)
N ₂ O Emission and its driving factors from typical marsh and shrub swamp in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China	SHI Lanying, MU Changcheng, TIAN Xinmin, et al (4799)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 16 期 (2011 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 16 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元